

**ВАРИАЦИИ ЖЕСТКОСТЕЙ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В НОЯБРЕ 2004 г.*****VARIATIONS IN COSMIC RAY CUTOFF RIGIDITIES DURING
THE GREAT GEOMAGNETIC STORM OF NOVEMBER 2004*****М.И. Тясто***Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Санкт-Петербург, Россия, mtyasto@mail.ru***О.А. Данилова***Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Санкт-Петербург, Россия, md1555@mail.ru***Н.Г. Птицына***Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Санкт-Петербург, Россия, nataliaptitsyna@yandex.ru***В.Е. Сдобнов***Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, sdobnov@iszf.irk.ru***M.I. Tyasto***St.-Petersburg Filial of IZMIRAN, Saint Petersburg, Russia, mtyasto@mail.ru***O.A. Danilova***St.-Petersburg Filial of IZMIRAN, Saint Petersburg, Russia, md1555@mail.ru***N.G. Ptitsyna***St.-Petersburg Filial of IZMIRAN, Saint Petersburg, Russia, nataliaptitsyna@yandex.ru***V.E. Sdobnov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, sdobnov@iszf.irk.ru*

Аннотация. Очень сильное межпланетное и магнитосферное возмущение, наблюдавшееся 7–13 ноября 2004 г., можно рассматривать как одно из сильнейших событий за весь период космических наблюдений. Исследованы вариации жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО) космических лучей (КЛ) во время этой бури и показано, как штормовые условия могут повлиять на доступ КЛ к внутренней магнитосфере. Эффективные ЖГО были рассчитаны для выбранных точек на Земле методом прослеживания траекторий частиц КЛ через магнитосферу, описанную моделью Цыганенко в 2003 г. [Tsyganenko, 2002a, b; Tsyganenko et al., 2003]. Изменения в ЖГО определялись также методом спектрографической глобальной съемки (СГС) по экспериментальным данным сети нейтронных мониторов. Были исследованы корреляционные соотношения между расчетными и экспериментальными ЖГО, а также между D_{st} -индексом геомагнитной активности и межпланетными параметрами. Коэффициенты корреляции между ЖГО, полученными методом прослеживания траекторий и методом СГС, находятся в пределах 0.76–0.89 для всех выбранных точек, за исключением низкоширотной станции Токио (0.35). Наиболее сильная корреляция была выявлена между ЖГО, изменения которых достигают ~1–1.5 ГВ во время магнитной бури, и D_{st} -индексом.

Ключевые слова: космические лучи, жесткость обрезания, магнитные бури, модель магнитосферы.

Abstract. Very strong interplanetary and magnetospheric disturbance observed on 7–13 November 2004 can be regarded as one of the strongest events during the entire period of space observations. In this paper, we report on the studies of cosmic ray cutoff rigidity variations during 7–13 November 2004 showing how storm conditions can affect the direct cosmic ray access to the inner magnetosphere. Effective cutoff rigidities have been calculated for selected points on the ground by tracing trajectories of cosmic ray particles through the magnetospheric magnetic field of the “storm-oriented” Tsyganenko 2003 model [Tsyganenko, 2002a, b; Tsyganenko et al., 2003]. Cutoff rigidity variations have also been determined by the spectrographic global survey method on the basis of experimental data of the neutron monitor network. Correlations between the calculated and experimental cutoff rigidities, as well as between geomagnetic D_{st} index and interplanetary parameters have been investigated. Correlation coefficients between the cutoff rigidities obtained by the trajectory tracing method and the spectrographic global survey method have been found to be in the limits of 0.76–0.89 for all stations except the low-latitude station Tokyo (0.35). The most pronounced correlation has been revealed between the cutoff rigidities that exhibited a very large variation of ~1–1.5 GV during the magnetic storm, and the D_{st} index.

Keywords: Cosmic rays, cutoff rigidity, magnetic storms, magnetospheric model.

* На английском языке статья опубликована в журнале “Advanced in Space Research”. 2013. V. 51, N 7. P. 1230–1237. На русском языке публикуется впервые по лицензии издательства IOPscience.

ВВЕДЕНИЕ

Планетарное распределение жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО) космических лучей (КЛ), т. е. самой низкой жесткости, которой должна обладать частица, чтобы проникнуть в заданную точку в магнитосфере, определяется пространственной структурой и интенсивностью магнитосферного магнитного поля. Динамические процессы в магнитосфере приводят к вариациям магнитосферного магнитного поля и, следовательно, к вариациям КЛ, которые связаны с изменениями ЖГО [Dorman et al., 1973; Flueckiger et al., 1986; Smart et al., 2000].

Проблема влияния возмущений геомагнитного поля на ЖГО наиболее детально рассмотрена в работах [Shea et al., 1965, 1976; Dorman et al., 1973; Flueckiger et al., 1983; Тясто, 1991; Smart et al., 2000; Kress et al., 2004; Belov et al., 2005; Tyasto et al., 2008; Kudela et al., 2008].

Для определения ЖГО обычно используется метод прослеживания траекторий частиц КЛ в магнитном поле магнитосферы, описываемой моделью, в которой учитываются магнитное поле внутренних источников и поля от систем электрических токов в магнитосфере.

В большинстве статей рассматриваются изменения ЖГО во время умеренных геомагнитных возмущений. Оценки временных изменений ЖГО и асимптотических направлений для отдельных наземных станций, полученные для разных моделей магнитосферного магнитного поля во время сильных магнитных возмущений, весьма существенно различаются [Kudela et al., 2008]. Сильные магнитные бури являются относительно редкими явлениями, следовательно, данные для очень возмущенных периодов составляют малую часть данных, используемых для создания эмпирических моделей магнитного поля магнитосферы. Это объясняет, почему модели магнитосферного магнитного поля для сильно возмущенной магнитосферы [Tsyganenko, 2002a, b; Tsyganenko et al., 2003; Tsyganenko, Sitnov, 2005] были разработаны позднее, чем модели для умеренных бурь.

Солнечные вспышки и эруптивные выбросы наблюдались в конце октября — начале ноября 2004 г. Повышенная солнечная активность была связана с прохождением по диску Солнца двух групп пятен — активных областей (АО) 10691 и 10696 [Ермолаев и др., 2008]. Число и мощность вспышек были не очень высоки, тем не менее магнитная буря 7–13 ноября 2004 г. была одной из самых сильных за весь период наблюдений D_{st} -индекса. Буря, по-видимому, была вызвана межпланетным корональным выбросом массы с сильным магнитным полем южного направления (~45 нТл). Эта магнитная буря состояла из двух бурь, следующих одна за другой. Минимум D_{st} первой бури ($D_{st} = -373$ нТл) приходится на 06 UT 8 ноября, второй бури ($D_{st} = -295$ нТл) — на ~10 UT 10 ноября 2004 г. Начальная фаза второй бури наблюдалась на фазе восстановления первой бури, когда D_{st} -вариация была еще достаточно сильной (~100 нТл).

Целью нашей работы является исследование изменений проникновения КЛ во внутреннюю магни-

тосферу, вызванных возмущением магнитного поля во время бури 7–14 ноября 2004 г. Мы использовали модель Цыганенко, которая описывает магнитосферное магнитное поле в условиях сильной возмущенности [Tsyganenko, 2002a, b; Tsyganenko et al., 2003]. Для расчета ЖГО методом СГС были взяты данные наблюдений КЛ мировой сети нейтронных мониторов [Dvornikov, Sdobnov, 2002].

1. МЕТОДЫ

Мы сравнили изменения ЖГО $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{СГС}}$, полученные двумя принципиально разными методами, т. е. методом расчета траекторий частиц КЛ в магнитном поле по модели Цыганенко T03 [Tsyganenko, 2002a,b; Tsyganenko et al., 2003] ($\Delta R_{\text{эф}}$) и методом СГС ($\Delta R_{\text{СГС}}$) по экспериментальным исправленным на давление данным регистрации интенсивности КЛ мировой сетью нейтронных мониторов (38 NM). Первый метод можно назвать теоретическим, второй — экспериментальным. Магнитное поле в модели Цыганенко T03 представляет собой сумму главного магнитного поля от внутренних источников и поля от внешних источников (магнитосферных токовых систем). Главное магнитное поле от внутренних источников представлено международным аналитическим полем (МАП) (International Geomagnetic Reference Field — IGRF) для эпохи 2000 г. и экстраполировано на 2004 г. с учетом вековых вариаций [<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>].

Изменения $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{СГС}}$ определялись для каждого часа в период 7–13 ноября 2004 г. как разности между рассчитанными значениями ЖГО, теоретическими и экспериментальными, и ЖГО в спокойный добуревоый период (6 ноября 2004 г.). Расчеты были выполнены для станций КЛ, расположенных на разных широтах и имеющих разные ЖГО для спокойного времени: Хобарт, Рим, Москва, Иркутск, Алматы и Токио. ЖГО в главном геомагнитном поле для этих станций перекрывают большую часть области влияния геомагнитного поля на КЛ. Значения среднесуточных эффективных ЖГО R_0 6 ноября 2004 г. составляли 1.78 ГВ для Хобарта, 2.12 ГВ для Москвы, 3.25 ГВ для Иркутска, 6.09 ГВ для Рима, 6.18 ГВ для Алматы и 11.01 ГВ для Токио.

1.1. Теоретический метод определения ЖГО (метод расчета траекторий)

Чтобы рассчитать изменения эффективных жесткостей обрезания $\Delta R_{\text{эф}}$ теоретически, мы использовали метод прослеживания траекторий частиц КЛ в модельном магнитосферном магнитном поле [McCracken et al., 1962; Дорман и др., 1972; Dorman, 2004, 2009]. Траектории частиц могут быть разрешенными или запрещенными [Дорман и др., 1972; Shea et al., 1976; Cooke et al., 1991; Dorman, 2004, 2009]. Если отрицательно заряженная частица, движущаяся от Земли наружу из данной точки на поверхности Земли в заданном направлении, может достичь границы магнитосферы, то ее траектория

считается разрешенной [Cooke et al., 1991]. Такая разрешенная траектория идентична траектории положительно заряженной частицы, приходящей из межпланетного пространства через магнитосферу в заданную точку с того же направления. Траектории считаются запрещенными, если движущаяся наружу отрицательно заряженная частица не достигает границы магнитосферы. Эффективная жесткость обрезания определяется как

$$R_{\text{эф}} = R_U - \sum_{i=R_L}^{R_U} \Delta R_i \text{ (разрешенные),}$$

где траектории рассчитываются с интервалом по жесткости ΔR_i ; R_U — верхняя пороговая жесткость, R_L — нижняя пороговая жесткость [Cooke et al., 1991]. Верхняя пороговая жесткость R_U — максимальная жесткость, при которой наблюдается первый переход от разрешенных траекторий к запрещенным в серии рассчитанных траекторий; нижняя пороговая жесткость R_L — жесткость, при которой наблюдается последний переход от разрешенных траекторий к запрещенным. $R_{\text{эф}}$ можно рассматривать как теоретическую жесткость обрезания.

Магнитное поле было представлено эмпирической моделью Цыганенко T03, описывающей сильно возмущенную конфигурацию магнитосферного магнитного поля и его эволюцию во время бури [Tsyanenko, 2002a, b; Tsyanenko et al., 2003]. В модели полное магнитное поле магнитосферы рассматривается как сумма полей, генерируемых внутренними и внешними источниками; учитываются вклады от таких внешних источников, как симметричный и асимметричный круговые токи, токи на магнитопаузе, биркеландовы токи и токи хвоста магнитосферы. Как указано выше, магнитное поле от внутренних источников было представлено моделью IGRF-2000 (МАП). Входными параметрами модели T03 являются D_{st} -вариация, компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) B_z и B_y , плотность N_{sw} , скорость V_{sw} и динамическое давление P_{dyn} солнечного ветра [http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/omni2_2004.dat].

1.2. Метод СГС

Жесткости геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{СГС}}$ определялись методом СГС, в котором данные измерений КЛ на мировой сети нейтронных мониторов рассматриваются как единый многоканальный прибор [Dvornikov, Sdobnov, 2002]. С помощью этого метода можно разделить наблюдаемые вариации КЛ на вариации межпланетного и магнитосферного происхождения. Предполагается, что анизотропия функции распределения КЛ вне земной магнитосферы зависит от питч-углов в ММП и от градиента плотности на ларморовском радиусе частицы [Dvornikov, Sdobnov, 2002]. Вариацию интегрального вторичного потока $\delta I_c/I_c$ (по отношению к фоновому уровню I_c), наблюдаемую в географическом пункте с жесткостью обрезания R_c на высоте h_c , можно представить как

$$\begin{aligned} \frac{\delta I_c}{I_c}(h_c) = & -\delta R_c(R_c) W_c(R_c, h_c) \left[1 + \frac{\delta J}{J}(R_c) \right] + \\ & + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_{R_c}^{\infty} \frac{\delta J}{J}(R, \Psi_c(R, \alpha, \beta), \lambda_c(R, \alpha, \beta)) \times \\ & \times W_c(R, \alpha, \beta, h_c) \sin \beta dR d\beta d\alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\delta R_c(R_c)$ — вариация ЖГО R_c , $\frac{\delta J}{J}(R_c)$ —

вариация интенсивности первичных КЛ; $W_c(R, \alpha, \beta, h_c)$ — коэффициенты связи между первичным и вторичным потоками КЛ, которые удовлетворяют условиям нормировки

$$\int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{\pi/2} \sin \beta d\beta \int_{R_c(\alpha, \beta)}^{\infty} W_c^i(R_c, \alpha, \beta, h_c) dR = 1,$$

где α, β — азимутальный и зенитный угол прихода первичных частиц на границу атмосферы; $\Psi_c(R, \alpha, \beta)$ и $\lambda_c(R, \alpha, \beta)$ — асимптотические углы прихода частицы в солнечно-эклиптической системе координат. Первый и второй члены в правой части (1) представляют собой вариации КЛ геомагнитосферной и внемагнитосферной природы. Мы ограничили наше внимание двумя сферическими анизотропными гармониками [Dvornikov, Sdobnov, 2002]. Зависимость $\delta R_c(R_c)$ была представлена как

$$\delta R_c(R_c) = (b_1 R_c + b_2 R_c^2) (\sqrt{-R_c}) / \left(\frac{a_1}{R} + \frac{a_2}{R^2} + \frac{a_3}{R^3} + 1 \right). \quad (2)$$

Амплитуды вариаций интенсивности КЛ для пункта с жесткостью R_c можно записать в виде ряда

$$\frac{\delta J}{J}(R_c) = \sum_{k=1}^3 a_{0k} R_c^{-k}. \quad (3)$$

Вариации потока первичных КЛ задаются как

$$\begin{aligned} \frac{\delta J}{J}(R, \Psi, \lambda) = & \sum_{k=1}^3 a_{0k} R_c^{-k} + \\ & + \sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left[(c_{nk} R^{-k}) P_n(\mu) \right] + \sum_{k=1}^2 (d_{1k} R^{-k}) P_n(v), \end{aligned} \quad (4)$$

где $P_n(\mu)$ и $P_n(v)$ — полиномы Лежандра;

$$\mu = \cos \Theta = \sin \lambda \sin \lambda_0 + \cos \lambda \cos \lambda_0 \cos(\psi - \psi_0),$$

где Θ — угол между вектором скорости частицы \vec{V} и вектором ММП \vec{B} (питч-угол); углы ψ_0 и λ_0 характеризуют ориентацию поля в геоцентрических эклиптических координатах; углы ψ и λ определяют направление движения частицы на границе магнитосферы Земли.

$$\text{Имеем } v = \cos \Phi = \sin \lambda \sin \xi_0 + \cos \lambda \cos \xi_0 \cos(\psi - \Phi_0),$$

где Φ — угол между \vec{V} и $\vec{B} \vec{V} n_{\perp}$; $\vec{V} n_{\perp}$ — компонента градиента плотности КЛ, перпендикулярная \vec{B} , углы ξ_0 и Φ_0 характеризуют ориентацию вектора $\vec{B} \vec{V} n_{\perp}$. По условию ортогональности векторов \vec{B} и $\vec{B} \vec{V} n_{\perp}$ угол ξ_0 может быть представлен как

$$\xi_0 = \arctg [-(\cos \psi_0 \cos \Phi_0 + \sin \psi_0 \sin \Phi_0) \cos \lambda_0].$$

Спектры жесткости изотропной и анизотропной компонент аппроксимировались рядами по обратным степеням жесткости частиц.

С учетом вышеизложенных предположений интенсивность вторичных КЛ (измеренных на поверхности Земли) описывается следующей системой нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\delta I_c^i}{I_c^i}(h_i) = & -\Delta R_c W^i(R_c, h_i) + \\ & + \int_{R_c}^{\infty} \left\{ \sum_{k=1}^3 a_{0k} R_c^{-k} + \sum_{n=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left[(c_{nk} R^{-k}) P_n(\mu) \right] + \right. \\ & \left. + \sum_{k=1}^2 (d_{1k} R^{-k}) P_n(v) \right\} W_c^i(R, \alpha, \beta, h_i) dR. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\frac{\delta I_c^i}{I_c^i}(h_i)$ — амплитуды вариаций интегрально-го потока вторичных частиц (относительно некоторого фонового уровня I_c^i), наблюдаемых в географическом пункте с жесткостью R_c на высоте h_i в атмосфере Земли (т. е. данные нейтронных мониторов мировой сети). В уравнениях (2)–(5) асимптотические углы $\psi_c(R)$ и $\lambda_c(R)$ прихода частиц в пункт с жесткостью R_c , должны использоваться вместо ψ и λ .

Неизвестные параметры b_1, b_2, a_1, a_2 и a_3 описывают вариации ЖГО R_c ; a_{01}, a_{02} , и a_{03} — вариации дифференциального спектра жесткости изотопной компоненты; $c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}, d_{11}$ и d_{12} связаны с двумя компонентами первой и второй гармоник углового распределения КЛ; ψ_0, λ_0, ξ_0 и Φ_0 определяют ориентацию осей симметрии. Эти неизвестные параметры были рассчитаны методом наименьших квадратов [Dvornikov, Sdobnov, 2002; Dorman, 2009]. Таким образом, метод СГС позволяет определить изменения ЖГО, вариации параметров спектра жесткости КЛ и анизотропию в межпланетном пространстве. В этой работе мы ограничились исследованием только ЖГО, полученных этим методом в широкой области широт. Изменения в ЖГО $\Delta R_{\text{СГС}}$, полученные методом СГС, можно считать экспериментальными.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Временные вариации жесткости геомагнитного обрезания в период бури 7–13 ноября 2004 г.

Временные изменения в рассчитанных $\Delta R_{\text{эф}}$ (кружки) и экспериментальных $\Delta R_{\text{СГС}}$ (крестики) ЖГО 7–13 ноября 2004 г. показаны на рис. 1 для станций Токио, Алматы, Рим, Иркутск, Москва и Хобарт. В нижней части показаны D_{st} -индекс, K_p -индекс, скорость V_{sw} и плотность N_{sw} солнечного ветра [http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/omni2_2004.dat]. Видно, что максимальное понижение ЖГО наблюдается 8 и 10 ноября 2004 г. в периоды главной фазы первой (7–10 ноября 2004 г.) и второй (9–11 ноября 2004 г.) магнитных бурь. Наиболее сильные понижения $\Delta R_{\text{эф}}$, до 1.5 ГВ, наблюдаются

8 ноября на всех станциях. В связи с этим следует обратить внимание на анализ вариаций ЖГО во время сильного геомагнитного возмущения в октябре–ноябре 2003 и ноябре 2004 г., проведенный в работах [Kuznetsov et al. 2006] и [Kudela et al. 2008]. Для расчетов $\Delta R_{\text{эф}}$ авторы использовали магнитосферную модель Цыганенко 2004 г. Ts04 [Tsyanenko, Sitnov, 2005], которая является, по их мнению, улучшенной версией модели Цыганенко T03 [Tsyanenko, 2002a, b; Tsyanenko et al. 2003]. Кузнецов и др. [Kuznetsov et al. 2006] получили понижение $\Delta R_{\text{эф}} \sim 1.15$ ГВ на средних широтах для бури в ноябре 2004 г., что довольно хорошо согласуется с нашими результатами.

На рис. 1 видно дополнительное очень сильное понижение экспериментальных ЖГО $\Delta R_{\text{СГС}}$ на ст. Токио 9 ноября 2004 г. с минимальным значением жесткости в 21 UT ($\Delta R_{\text{СГС}} = 1.1$ ГВ). Это понижение требует дальнейшего исследования.

В целом кривые $\Delta R_{\text{СГС}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ лучше коррелируют между собой и с D_{st} -вариацией в период первой бури, чем второй. Наиболее значительные отличия между кривыми $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{СГС}}$ наблюдаются на ст. Москва ($R_0 = 2.12$ ГВ) и Хобарт ($R_0 = 1.78$ ГВ) во время минимумов D_{st} , т. е. в 5–6 UT 8 ноября и в 9–10 UT 10 ноября 2004 г., причем разница между $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{СГС}}$ для ст. Хобарт больше, чем для ст. Москва. Различия между $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{СГС}}$, возможно, указывают на несовершенство модели на высоких широтах. Действительно, модель T03 описывает магнитное поле возмущенной магнитосферы до расстояний $R \leq 15 R_E$, при этом поле от токов удаленного хвоста не принимается во внимание. Поперечные токи хвоста в ближней части магнитосферы и токи удаленного хвоста изменяются различным образом. В то время как внутренняя часть токов хвоста очень чувствительна к южной компоненте ММП B_z , ток дальнего хвоста отзывается в основном на давление солнечного ветра [Tsyanenko, 2002a, b; Tsyanenko et al., 2003]. Это важно для частиц КЛ с жесткостями $R \leq 5$ ГВ, которые приходят к земной поверхности в основном через хвост магнитосферы [Dorman et al., 1971; Dorman, 2009]. Как показано выше, ЖГО в спокойный день 6 ноября составляла $R_0 = 2.12$ ГВ для Москвы и 1.78 ГВ для ст. Хобарт.

Исследования токовых систем хвоста магнитосферы [Greenspan, Hamilton, 2000; Maltsev, 2004; Maltsev, Ostapenko, 2004] показали, что токи, ответственные за депрессию магнитного поля, имеют большую долготную асимметрию. Они создают аксиально-асимметричное возмущение в магнитном поле магнитосферы, которое может влиять на глобальное распределение ЖГО сложным образом. Результатом этого является то, что ЖГО в некоторых географических пунктах, особенно в районах сильных градиентов и аномалий, могут вести себя нестандартным образом. Например, Пчелкин и др. [Pchelkin et al. 2007] обнаружили, что во время геомагнитной бури в ноябре 2003 г. в районе ст. Мехико наблюдается локальная особенность в мировом распределении ЖГО. Как уже упоминалось выше, на рис. 1 видно довольно сильное понижение экспериментальных ЖГО

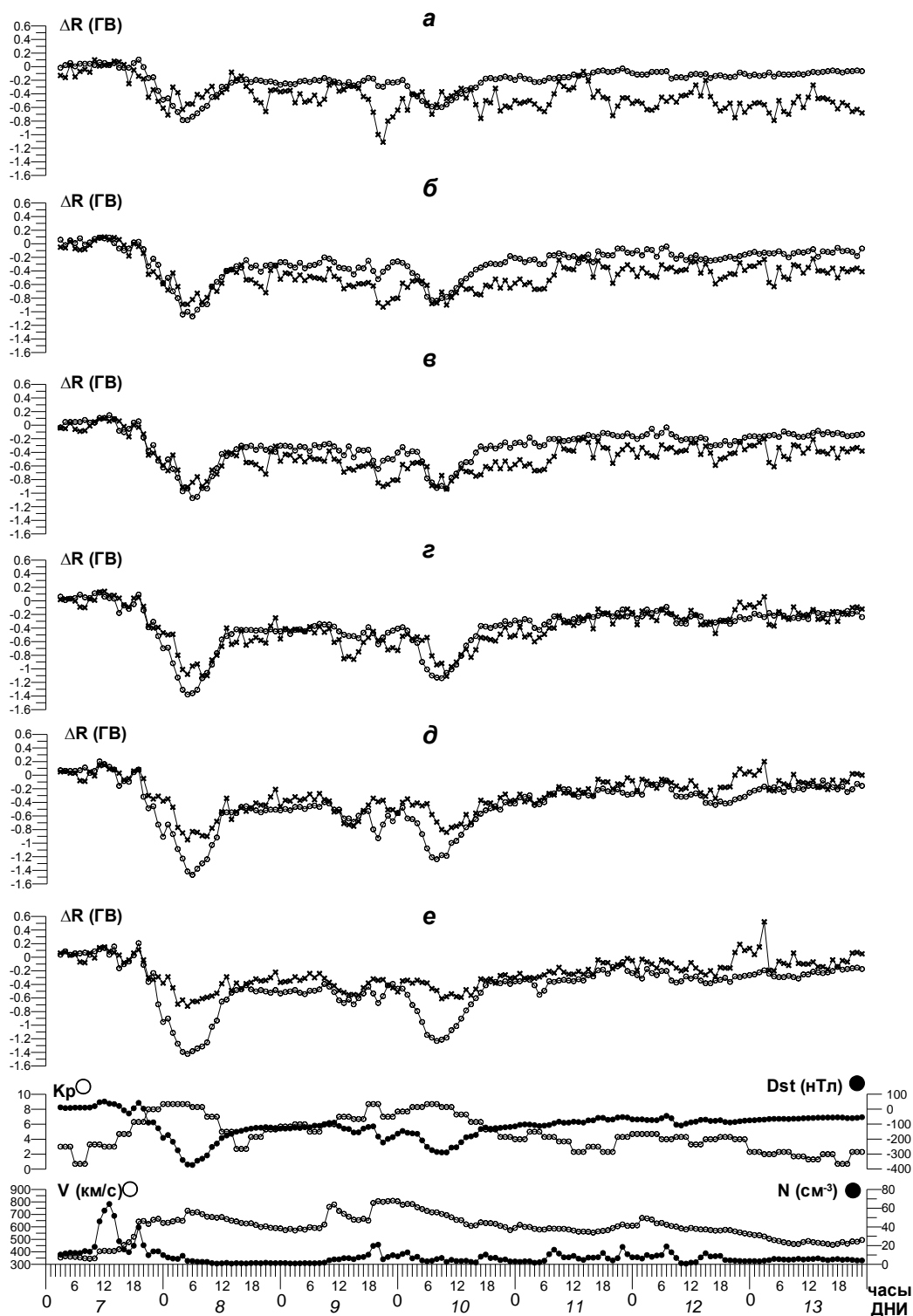


Рис. 1. Жесткости обрезания космических лучей в период бури 7–13.11.2004 ($R_{эф}$ — кружки, $R_{сгс}$ — крестики); а — Токио, б — Алматы, в — Рим, г — Иркутск, д — Москва, е — Хобарт

$\Delta R_{сгс}$ на низкоширотных станциях. Например, на ст. Токио наблюдается понижение геомагнитного порога 9 ноября 2004 г. с минимумом $\Delta R_{сгс}=1.1$ ГВ в 21 UT. Понижение $\Delta R_{сгс}$ в это же время наблюдается и на ст. Алматы и Рим, но оно имеет заметно меньшую амплитуду и становится меньше с увеличением широты станции. Обычно полагают, что магнитосферный эффект сильнее на средних широтах и слабее на низких, поэтому можно предположить, что он

может иметь немагнитосферное происхождение [Dorman, 2009].

Результаты анализа корреляций между изменениями $\Delta R_{эф}$, рассчитанными с использованием модели T03, и экспериментальными $\Delta R_{сгс}$ приведены в табл. 1 и на рис. 2. Корреляционные коэффициенты K между $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$ находятся в пределах 0.76–0.88 на всех станциях, кроме Токио, где коэффициент опускается до 0.27.

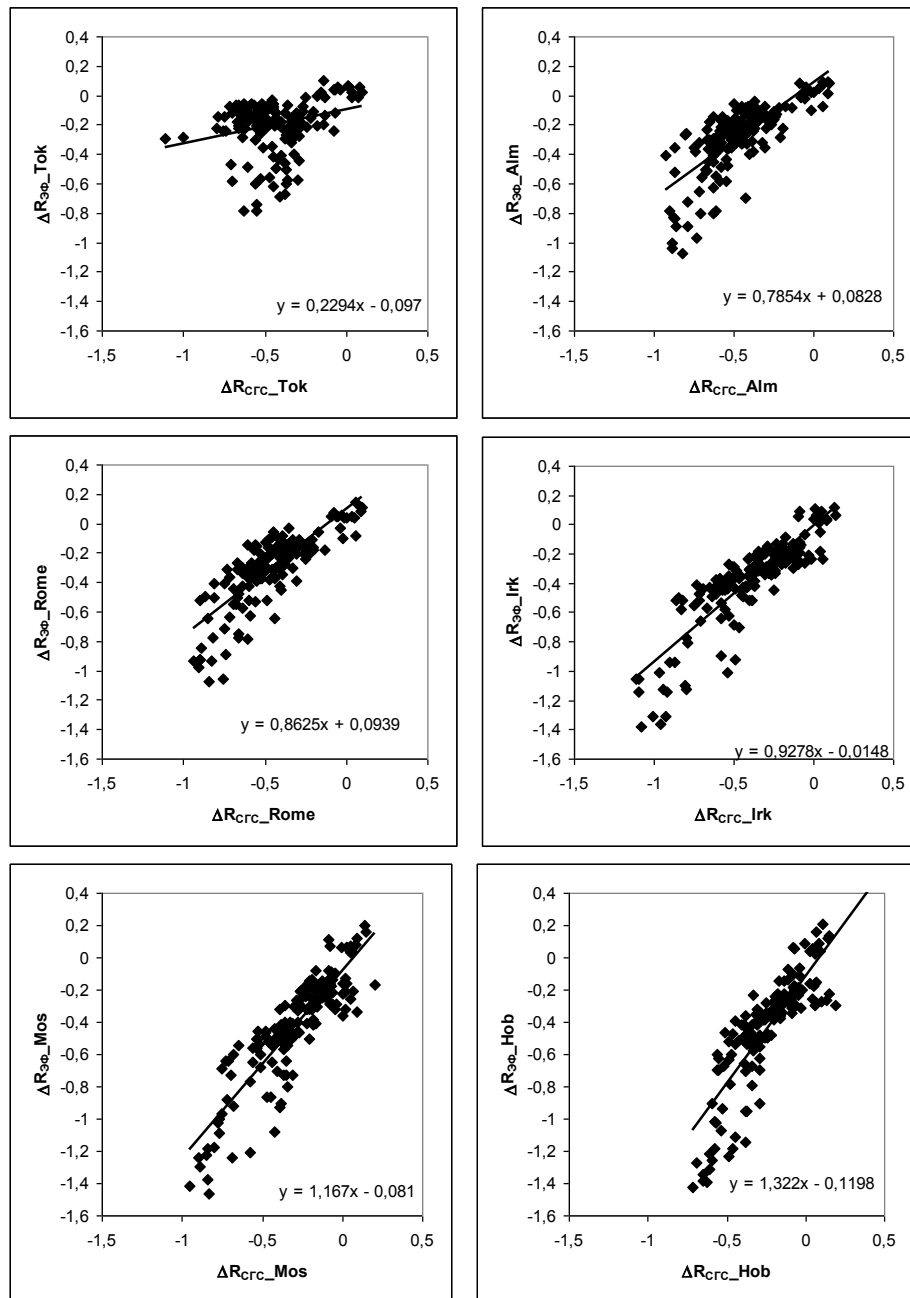
Рис. 2. Корреляция между $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ для бури 7–13 ноября 2004 г.

Таблица 1

Коэффициенты K корреляции между $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$

Станция	Токио	Алматы	Рим	Иркутск	Москва	Хобарт
K	0.27	0.76	0.82	0.87	0.88	0.83

Более детальный анализ коэффициентов K корреляции для Токио, проведенный отдельно для двух главных фаз первой и второй бурь, показал, что эти коэффициенты сильно различаются: для первой бури $K=0.76$, для второй $K=0.05$.

Очень низкая корреляция между теоретическими и экспериментальными значениями ΔR может быть следствием сильного понижения $\Delta R_{сгс}$ 9 ноября 2004 г. после 14 UT и отсутствия этой особенности в $\Delta R_{эф}$. Это понижение наблюдается на всех станциях, но понижение в $\Delta R_{эф}$ и соответственно разница между

$\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ наиболее заметны на ст. Токио. Заслуживает внимания тот факт, что сильное понижение в $\Delta R_{сгс}$ 9 ноября в 21 UT на низкоширотных станциях совпадает по времени с приходом межпланетной ударной волны и прохождением переднего края магнитного облака через орбиту Земли [Ермолаев и др., 2005; Ermolaev et al., 2008]. Можно предположить, что подобные эффекты недостаточно полно учтены в модели Цыганенко T03.

В табл. 2 представлены понижения геомагнитных порогов в минимуме D_{st} -вариаций в ходе первой и второй геомагнитных бурь исследуемого возмущения 7–13 ноября 2004 г.

Видно, что наиболее сильное понижение $\Delta R_{эф} \sim (68–79) \%$ наблюдалось на ст. Москва и Хобарт во время первой бури и чуть ниже $\sim (56–67) \%$ — во время

Таблица 2

Понижения жесткостей обрезания КЛ
во время минимумов D_{st}

Станция		8 ноября 2004 г. ($D_{st} = -373$ нТл)				10 ноября 2004 г. ($D_{st} = -295$ нТл)			
		$\Delta R_{эф}$		$\Delta R_{сгс}$		$\Delta R_{эф}$		$\Delta R_{сгс}$	
		ГВ	%	ГВ	%	ГВ	%	ГВ	%
1	Токио	0.76	6.9	0.55	5	0.58	5.3	0.42	3.8
2	Алматы	1.04	16.8	0.86	13.9	0.79	12.8	0.8	12.9
3	Рим	1.04	16.4	0.88	14.4	0.91	14.9	0.84	13.8
4	Иркутск	1.36	42.2	1.02	31.4	1.1	33.8	1.02	31.4
5	Москва	1.44	67.9	0.89	42	1.18	55.7	0.82	38.7
6	Хобарт	1.4	78.6	0.68	38.2	1.2	67.4	0.6	33.7

второй. Понижения экспериментальных $\Delta R_{сгс}$ для тех же станций несколько ниже — (38–42) % и (34–39) % соответственно. Таким образом, теоретическое значение ЖГО на ст. Москва в минимуме D_{st} 8 ноября 2004 г. близко к значению ЖГО для спокойного времени приполярной ст. Апатиты (0.7 ГВ).

2.2. Корреляции между $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ и межпланетными параметрами

На рис. 3, 4 показаны коэффициенты K корреляции между $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ с D_{st} -вариацией и межпланетными параметрами — компонентами ММП B_z и B_y и параметрами солнечного ветра — плотностью N_{sw} , скоростью V_{sw} и динамическим давлением P_{dyn} . Межпланетные параметры B_z , B_y , N_{sw} , V_{sw} и P_{dyn} являются входными для модели T03 и определяют структуру и интенсивность магнитного поля во всей магнитосфере. Как видно из рис. 3, 4, коэффициенты корреляции $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ с D_{st} довольно высоки для всех станций (0.59–0.68), кроме Токио (0.35). D_{st} -вариация и южная компонента ММП B_z ответственны за ослабление магнитосферного магнитного поля в околоземном космическом пространстве. Мы видим, что корреляция между теоретическими $\Delta R_{эф}$ и B_z довольно высока (0.59–0.68), в то время как корреляция между $\Delta R_{сгс}$ и B_z хуже: она составляет всего 0.08 в Токио и 0.33–0.41 для всех других станций. Анализ корреляций между динамическими параметрами солнечного ветра V_{sw} , N_{sw} , P_{dyn} и ЖГО дает несколько неожиданные результаты. Динамическое давление солнечного ветра P_{dyn} в основном определяется V_{sw} и N_{sw} . Форма и размер магнитопазузы однозначно определены в модели T03 динамическим давлением, ММП и углом наклона геоидполя [Tsyganenko, 2002a, b]. Следовательно, P_{dyn} должно отражаться в ЖГО. Как видно из рис. 3, 4, существует довольно высокая корреляция между V_{sw} и $\Delta R_{эф}$ (0.64–0.73) и $\Delta R_{сгс}$ (0.69–0.73) для всех станций и заметно ниже корреляция для «Токио» (0.40). Корреляция между N_{sw} и $\Delta R_{эф}$ (0.38–0.41), а также между N_{sw} и $\Delta R_{сгс}$ (0.38–0.52) ниже, но все еще значительна. Тем не менее коэффициенты корреляции $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ с P_{dyn} не выше 0.2.

Возможно, отсутствие корреляции между ЖГО и P_{dyn} находится в соответствии с результатами статистического анализа экспериментальных данных о параметрах потока солнечного ветра [Khabarova, Rudenchik, 2003], которые показали, что более сильное влияние на P_{dyn} имеет плотность солнечного ветра,



Рис. 3. Коэффициенты корреляции между $\Delta R_{эф}$ и D_{st} и межпланетными параметрами

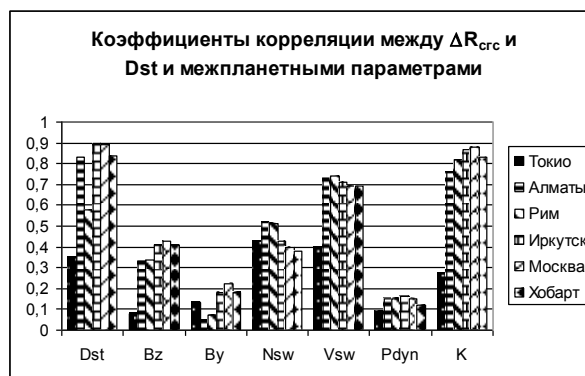


Рис. 4. Коэффициенты корреляции между $\Delta R_{сгс}$ и D_{st} и межпланетными параметрами

а не скорость. Оказалось, что коэффициент корреляции между P_{dyn} и N_{sw} составляет 0.77, а коэффициент корреляции между P_{dyn} и V_{sw} — всего 0.06. Однако по нашим данным изменения ЖГО коррелируют с V_{sw} гораздо лучше, чем с N_{sw} (см. рис. 3).

Таким образом, наши результаты показывают, что именно D_{st} -вариация имела наиболее выраженный эффект в изменениях ЖГО во время магнитной бури в ноябре 2004 г.

3. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали ЖГО КЛ во время сильно возмущенного периода 7–13 ноября 2004 г. Рассчитывались теоретические эффективные ЖГО методом прослеживания траекторий частиц КЛ в модельном магнитном поле возмущенной магнитосферы (Цыганенко T03). Расчеты были выполнены для ряда станций КЛ, геомагнитные пороги которых в спокойное время охватывают область от ~1.5 до ~11.0 ГВ, т. е. основную область влияния магнитного поля магнитосферы на КЛ. Экспериментальные ЖГО рассчитывались методом СГС по данным регистрации КЛ на мировой сети нейтронных мониторов. Результаты можно резюмировать следующим образом.

1. Было обнаружено, что понижения ЖГО КЛ, полученные принципиально разными методами (методом расчета траекторий частиц в модельном магнитном поле и методом СГС по данным непосредственной регистрации КЛ мировой сетью станций), достигают ~1–1.5 ГВ во время сильной магнитной бури в ноябре 2004 г.

2. Сравнение временных вариаций в экспериментальных $\Delta R_{\text{СГС}}$ и теоретических $\Delta R_{\text{эф}}$ ЖГО во время рассматриваемого возмущенного периода показало, что оба метода дают похожие результаты. Достаточно высокие коэффициенты корреляции (0.76–0.88) между экспериментальными $\Delta R_{\text{СГС}}$ и теоретическими $\Delta R_{\text{эф}}$ для всех станций, за исключением Токио, свидетельствуют о том, что модель T03 отражает основные черты сильно возмущенной реальной магнитосферы. В экспериментальных $\Delta R_{\text{СГС}}$ наблюдается аномальное поведение на низкоширотной ст. Токио и в меньшей степени на ст. Алматы и Рим во время второй бури возмущенного периода 7–13 ноября 2004 г. Сильное понижение на 1.1 ГВ в экспериментальных $\Delta R_{\text{СГС}}$ 9 ноября 2004 г. в Токио вызвано эффектом, природа которого пока не известна.

3. Анализ корреляций вариаций ЖГО с D_{st} и параметрами солнечного ветра показал, что самые высокие коэффициенты корреляции наблюдаются для D_{st} (соответственно 0.85 и 0.95 для $\Delta R_{\text{СГС}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$). Весьма заметные, но гораздо более слабые корреляции отмечаются между теоретическими и экспериментальными ЖГО и N_{sw} , V_{sw} и B_z . Коэффициенты корреляции $\Delta R_{\text{СГС}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ с P_{dyn} и B_y незначительны (не более 0.2). Таким образом, вариации ЖГО во время рассматриваемого бурового периода в основном обусловлены D_{st} -вариацией.

4. Результаты, представленные в этой работе, показывают, что изменения теоретических $\Delta R_{\text{эф}}$ и экспериментальных $\Delta R_{\text{СГС}}$ согласуются между собой. Точность полученных теоретических $\Delta R_{\text{эф}}$ определяется точностью модели магнитосферы, построенной по данным спутниковых измерений магнитного поля. В основе точности $\Delta R_{\text{СГС}}$ лежит точность измерений интенсивности КЛ на мировой сети станций.

Таким образом, эмпирическая модель магнитосферы T03, достаточно хорошо описывающая возмущенное магнитное поле, и метод СГС, в котором используется современная сеть станций КЛ, позволяют получать общее распределение изменений ЖГО и их временную динамику.

Эта работа была поддержана РФФИ, грант № 07-02-00920 и Программой Президиума РАН № 16. Мы благодарим сотрудников мировой сети станций КЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дорман Л.И., Гущина Р.Г., Shea M.A., Smart D.F. Эффективные жесткости обрезания космических лучей. М.: Наука, 1972. 280 с.

Ермолаев Ю. И. и др. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 6. С. 1–41.

Тясто М.И. Изменения пороговых жесткостей космических лучей под влиянием круговых токов различной конфигурации // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 1. С. 49–52.

Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., et al. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, A09S20. DOI:10.1029/2005JA011067.

Cooke D.J., Humble J.E., Shea M.A., et al. On cosmic ray cutoff terminology // Nuovo Cimento. 1991. V. 14. P. 213–224.

Dorman L.I. Cosmic Rays in Magnetospheres of the Earth and other Planets. Springer, 2009. 779 p.

Dorman L.I., Smirnov V.S., Tyasto M.I. Cosmic Rays in the Earth's Magnetic Field. Washington, NASA, Springfield, Va. 1971. 423 p.

Dvornikov V.E., Sdobnov V. E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 July 1982 // Intern. J. Geomagn. Aeron. 2002. V. 3. P. 217–223.

Ermolaev U.I., Zelenyi L.M., Zastenker V.D., et al. Magnetic storm of November, 2004: Solar, interplanetary, and magnetospheric disturbances // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70. P. 334–341.

Flueckiger E.O., Smart D.F., Shea M.A. The effect of local perturbations of the geomagnetic field on cosmic ray cutoff rigidities at Jungfraujoch and Kiel // J. Geophys. Res. 1983. V. 88, N A9. P. 6961–6968.

Flueckiger E.O., Smart D.F., Shea M.A. A procedure for estimating the changes in cosmic ray cutoff rigidities and asymptotic directions at low and middle latitudes during periods of enhanced geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1986. V. 91, N A7. P. 7925–7930.

Greenspan M., Hamilton D.C. A test of the Dessler–Parker–Sckopke relation during magnetic storms // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 5419–5430.

Khabarova O.V., Rudenchik E.A. On the peculiarities of changes of solar wind and geomagnetic field oscillation regime before the magnetic storms – wavelet-analysis results // Electronic journal of Russian Academy of Science. The Earth sciences. 2003. № 1(21) URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-5.pdf

Kress B.T., Hudson M.K., Perry K.L., Slocum P.L. Dynamic modeling of geomagnetic cutoff for the 23–24 November 2001 solar energetic particle event // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31, Iss. 4, CiteID L04808. DOI: 10.1029/2003GL018599.

Kudela K., Bucik R., Bobik P. On transmissivity of low energy cosmic rays in the disturbed magnetosphere // J. Adv. Space Res. 2008. V. 42, N 7. P. 1300–1306. DOI: 10.1016/j.asr.2007.09.033

Kuznetsov S.N., Yushkov B.Y., Kassovicova J., et al. Changes of geomagnetic transmissivity in the disturbed magnetosphere: Ground-based and CORONAS-F observations // Czechoslovak J. Phys. 2006. V. 56, N 6. P. 629–639.

Maltsev Y.P. Points of controversy in the study of magnetic storms // Space Sci. Rev. 2004. V. 110 N 3–4. P. 227–277.

Maltsev Y.P., Ostapenko A.A. Azimuthally asymmetric ring current as a function of D_{st} and solar wind conditions // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 2989–2996.

McCracken K.G., Rao U.R., Shea M.A. The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field // M.I.T. Tech. Rep. 77, Lab. for Nucl. Sci. and Eng., Mass. Inst. of Technol., Cambridge. 1962.

Pchelkin V.V., Pchelkina E.V., Golovchanskaya I.V. Anomalous behavior of cutoff rigidity variation in the region of the Mexico station during a magnetic superstorm // Ann. Geophys. 2007. V. 25. P. 1721–1725.

Smart D.F., Shea M.A., Flueckiger E.O. Magnetospheric models and trajectory computations // Space Sci. Rev. 2000. V. 93. P. 271–298.

Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, N 17. P. 4117–4130.

Shea M.A., Smart D.F., Carmichael H. Summary of Cutoff Rigidities Calculated with the International Geomagnetic Reference Field for Various Epochs. Rep. AFGL-TR-76-0115, Environ. Res. Pap. 561, Air Force Geophys. Lab., Bedford, Mass. 1976.

Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry. 1. Mathematical structure // J. Geophys. Res. 2002a. V. 107, N A8, P. 1179. DOI: 10.1029/2001JA000219, SMP12(1-17)

Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry. 2. Parameterization and fitting to observations // *J. Geophys. Res.* 2002b. V. 107, N A8. P. 1176. DOI: 10.1029/2001JA000220, SMP10(1-17).

Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A03208. DOI: 10.1029/2004JA010798.

Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere; How severe can it get? // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A5. P. 1209. DOI: 10.1029/2002JA009808.

Tyasto M.I., Danilova O.A., Dorman L.I., et al. On the possibility to check the magnetosphere model by CR: The strong geomagnetic storm in November 2003 // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42, N 9. P. 1556–1563.

REFERENCES

Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., et al. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, pp. A09S20. DOI: 10.1029/2005JA011067.

Cooke D.J., Humble J.E., Shea M.A., et al. On cosmic ray cutoff terminology. *Nuovo Cimento* 1991, vol. 14, pp. 213–224.

Dorman L.I. Cosmic Rays in Magnetospheres of the Earth and other Planets. Springer, 2009. 779 p.

Dorman L.I., Smirnov V.S., Tyasto M.I. Cosmic rays in the Earth's magnetic field. Washington, NASA, Springfield, VA. 1971. 423 p.

Dorman L.I., Guschina R.G., Shea M.A., Smart D.F. Effective cosmic ray cutoff rigidities. Moscow, Nauka Publ., 1972. 280 p. (in Russian).

Dvornikov V.E., Sdobnov V. E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 July 1982. *Intern. Journal Geomagn. Aeron.* 2002, vol. 3, pp. 217–223.

Ermolaev et al. One year later: Solar, heliospheric and magnetospheric disturbances of November, 2004. *Geomagnetizm i Aeronomiya [Geomagnetism and Aeronomy]*. 2005, vol. 45, no. 1. p. 23 (in Russian).

Ermolaev U.I., Zelenyi L.M., Zastenker V.D. et al. Magnetic storm of November, 2004: Solar, interplanetary, and magnetospheric disturbances. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, pp. 334–341.

Flueckiger E.O., Smart D.F., Shea M.A. The effect of local perturbations of the geomagnetic field on cosmic ray cutoff rigidities at Jungfraujoch and Kiel. *J. Geophys. Res.* 1983, vol. 88, no. A9, pp. 6961–6968.

Flueckiger E.O., Smart D.F., Shea M.A. A procedure for estimating the changes in cosmic ray cutoff rigidities and asymptotic directions at low and middle latitudes during periods of enhanced geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, no. A7, pp. 7925–7930.

Greenspan M., Hamilton D.C. A test of the Dessler-Parker-Sckopke relation during magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2000. vol. 105. pp. 5419–5430.

Khabarova O.V., Rudenchik E.A. On the peculiarities of changes of solar wind and geomagnetic field oscillation regime before the magnetic storms – Wavelet-analysis results. *Electronic journal of Russian Academy of Science. The Earth Sciences.* 2003, no 1(21). URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2003/screp-5.pdf.

Kress B.T., Hudson M.K., Perry K.L., Slocum P.L. Dynamic modeling of geomagnetic cutoff for the 23–24 November 2001 solar energetic particle event. *Geophys. Res. Lett.* 2004, vol. 31, iss. 4, CiteID L04808. DOI: 10.1029/2003GL018599.

Kudela K., Bucik R., Bobik P. On transmissivity of low energy cosmic rays in the disturbed magnetosphere. *J. Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, no. 7, pp. 1300–1306, DOI: 10.1016/j.asr.2007.09.033.

Kuznetsov S.N., Yushkov B.Y., Kassovicova J., et al. Changes of geomagnetic transmissivity in the disturbed magnetosphere: ground-based and CORONAS-F observations. *Czechoslovak J. of Phys.* 2006, vol. 56, no. 6, pp. 629–639.

Maltsev Y.P. Points of controversy in the study of magnetic storms // *Space Sci. Rev.* 2004. vol. 110, no. 3–4. pp. 227–277.

Maltsev Y.P., Ostapenko A. A. Azimuthally asymmetric ring current as a function of D_{st} and solar wind conditions. *Ann. Geophys.* 2004, vol. 22, pp. 2989–2996.

McCracken K.G., Rao U.R., Shea M.A. The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field, M.I.T. Tech. Rep. 77, Lab. for Nucl.Sci. and Eng., Mass. Inst. of Technol., Cambridge, 1962.

Pchelkin V.V., Pchelkina E.V., Golovchanskaya I.V. Anomalous behavior of cutoff rigidity variation in the region of the Mexico station during a magnetic superstorm. *Ann. Geophys.* 2007, vol. 25, pp. 1721–1725.

Smart D.F., Shea M.A., Flueckiger E.O. Magnetospheric models and trajectory computations. *Space Sci. Rev.* 2000, vol. 93, pp. 271–298.

Shea M.A., Smart D.F., and McCracken K.G. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, no. 17, pp. 4117–4130.

Shea M.A., Smart D.F., Carmichael H. Summary of Cutoff Rigidities Calculated with the International Geomagnetic Reference Field for Various Epochs, Rep. AFGL-TR-76-0115, Environ. Res. Pap. 561, Air Force Geophys. Lab., Bedford, Mass. 1976.

Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry. 1. Mathematical structure. *J. Geophys. Res.* 2002a, vol. 107, no. A8, pp. 1179. DOI: 10.1029/2001JA000219, SMP12(1-17).

Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry. 2. Parameterization and fitting to observations. *J. Geophys. Res.* 2002b, vol. 107, no. A8, pp. 1176. DOI: 10.1029/2001JA000220, SMP10(1-17).

Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, pp. A03208. DOI: 10.1029/2004JA010798.

Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere; How severe can it get? *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A5, pp. 1209. DOI: 10.1029/2002JA009808.

Tyasto M.I. Cosmic ray cutoff rigidity changes under the influence of ring currents of various configurations. *Geomagnetizm i Aeronomiya [Geomagnetism and Aeronomy]*. 1991, vol. 31, no. 1, pp. 49–52 (in Russian).

Tyasto M.I., Danilova O.A., Dorman L.I., et al. On the possibility to check the magnetosphere model by CR: The strong geomagnetic storm in November 2003. *Adv in Space Res.* 2008, vol. 42, no. 9, pp. 1556–1563.